### Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С.

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

### ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи ударного действия (ЭПУД) с линейным перемещением якоря позволяют за малое время набирать значительную кинетическую энергию на коротком активном участке и обеспечивать ударное силовое воздействие на объект деформирования [1-4]. Однако известные ЭПУД характеризуются значительными массогабаритными показателями, требуют мощного источника питания и обладают низкой эффективностью работы [5-7]. Все это обусловлено неоптимальными параметрами, несогласованием пространственно-временных показателей, различной скоростью изменения электрических и механических величин [8]. Поэтому при проектировании ЭПУД особое внимание уделяется оптимизационным расчетам [9, 10].

Целью статьи является разработка высокоэффективного автономного ЭПУД, включая разработку алгоритма выбора параметров с учетом заданных ограничений, моделирования электромеханических процессов, проведение экспериментальных исследований и создание опытного образца.

Для выбора параметров высокоэффективного ЭПУД будем использовать оптимизационный расчетный алгоритм, использующий адекватную математическую модель, при наличии ряда ограничений, например, по напряжению и параметрам емкостного накопителя, по массе и габаритам преобразователя, параметрам ускоряемого элемента и др.

Разрабатываемый ЭПУД содержит неподвижный индуктор с обмоткой из медной шины. Коаксиально с обмоткой индуктора установлен медный дисковый якорь, соединенный с силовой стальной пластиной, осуществляющей механическое воздействие на подвижный боек, заостренная часть которого установлена напротив объекта деформирования. Якорь с силовой пластиной при помощи пружины прижимается к обмотке индуктора [8]. При работе ЭПУД в циклическом режиме осуществляется возвратно-поступательное движение якоря с силовой пластиной, которая обеспечивает забивание бойка в деформируемый объект. При этом ход и характер перемещения якоря изменяется для каждого последующего рабочего цикла.

#### МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ

Методика выбора параметров ЭПУД основывается на математической модели, формируемой на основе рекуррентного алгоритма, у которого на каждом рабочем цикле при прямом ходе учитывается изменяемая магнитную связь между якорем и индуктором, возбуждаемым импульсом тока от емкостного накопителя, неравномерность распределения индуцированного тока в дисковом якоре, изменение сопротивления индуктора и якоря из-за нагрева импульсным током, электродинамических и противодействующих сил, действующих на якорь.

Для учета распределенного тока якорь представляется совокупностью элементарных короткозамкнутых *К* контуров, равномерно распределенных по поверхности диска, а многовитковый индуктор – первичным контуром, подсоединенным к емкостному накопителю. В таком случае электрические процессы в ЭПУД можно описать системой дифференциальных уравнений [8]:

$$\begin{split} R_{0}(T_{0}) \cdot i_{0} + L_{0} \frac{di_{0}}{dt} + \frac{1}{C} \int_{0}^{t} i_{0} dt + M_{01}(z) \frac{di_{1}}{dt} + \ldots + M_{0k}(z) \frac{di_{k}}{dt} + V(t) \left( i_{1} \frac{dM_{01}}{dz} + \ldots + i_{k} \frac{dM_{0k}}{dz} \right) &= U_{0}; \\ R_{1}(T_{1}) \cdot i_{1} + L_{1} \frac{di_{1}}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_{0}}{dt} + M_{12} \frac{di_{2}}{dt} + \ldots + M_{1k} \frac{di_{k}}{dt} + V(t) \left( i_{0} \frac{dM_{01}}{dz} + i_{2} \frac{dM_{12}}{dz} + \ldots + i_{k} \frac{dM_{1k}}{dz} \right) &= 0; \\ R_{k}(T_{k}) \cdot i_{k} + L_{k} \frac{di_{k}}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_{0}}{dt} + M_{1k} \frac{di_{1}}{dt} + \ldots + M_{k-1k} \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left( i_{0} \frac{dM_{0k}}{dz} + i_{1} \frac{dM_{1k}}{dz} + \ldots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) &= 0; \end{split}$$

где  $i_0$ ,  $L_0$ ,  $R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление обмотки индуктора;  $i_k$ ,  $L_k$ ,  $R_k$  - соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого k-го контура якоря, перемещающегося со скоростью V(t) вдоль оси z относительно индуктора;  $M_{kp}$  - взаимоиндуктивность между соответствующими токовыми контурами ( $k \neq p$ );  $T_k$  – температура k-го токового контура; C,  $U_0$  – соответственно емкость и напряжение емкостного накопителя.

При прямом ходе аксиальное перемещение якоря ∆Z с исполнительным элементом (ИЭ), представляющим собой силовую пластину с бойком, возникает под действием импульса электродинамических сил

$$FI = \int_0^t f_z(t, z) dt \, ,$$

где  $f_z(t,z) = i_0(t) \cdot \sum_{k=1}^{K} i_k(t) \frac{dM_{0k}}{dz}(z)$  - мгновенное значение силы.

Скорость якоря удобно представить в виде рекуррентного соотношения

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_P \cdot \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - 0.125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n),$$

где  $m_1, m_2$  - масса якоря и ИЭ, соответственно;  $K_P$  - коэффициент упругости пружины;  $K_T$  - коэффициент динамического сопротивления;  $\gamma_a$  - плотность воздуха;  $\beta_a$  - коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  - на-ружный диаметр силовой пластины.

Для определения температуры индуктора или якоря, изменяемой в течение рабочего цикла и распределенной по сечению, используется известное нелинейное уравнение теплопроводности

$$c(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T),$$

где c(T) - усредненная удельная теплоемкость;  $\gamma$  - усредненная плотность; j(t) - плотность тока;  $\lambda_w(T)$  – усредненный коэффициент теплопроводности;  $k_z$  - коэффициент заполнения индуктора;  $\rho(T)$  – удельное сопротивление.

Процесс выбора параметров ЭПУД заключается в нахождении совокупности параметров, обеспечивающих максимальные значения кинетической энергии, величины и импульса силы при минимальных потерях, функциональных и параметрических ограничениях.

Целевую функцию можно представить в виде

$$\zeta = \sum_{j=1}^4 \alpha_j \eta_j \,,$$

где  $\eta_i$  - функциональные параметры, равные

$$\begin{split} \eta_{1} &= \frac{2\sum_{k=0}^{K} \int i_{k}^{2}(t)R_{k}(T_{k})dt}{\left(m_{1}+m_{2}\right) \cdot V^{2}(t) + K_{p} \cdot \Delta Z^{2}(t) + 2\sum_{k=0}^{K} \int i_{k}^{2}(t)R_{k}(T_{k})dt}; \\ \eta_{2} &= 1 - \frac{1}{C \cdot U_{0}^{2}\left(m_{1}+m_{2}\right)} \left(\int f_{z}(t)dt\right)^{2}; \qquad \eta_{3} = 1 - 2\frac{i_{1}(t) \cdot i_{2}(t) \cdot \Delta Z_{e}(t)}{C \cdot U_{0}^{2}} \frac{dM_{12}}{dz}(z); \\ \eta_{4} &= 1 - \frac{V^{2}(t)\left(m_{1}+m_{2}\right)}{C \cdot U_{0}^{2}}; \end{split}$$

α<sub>*j*</sub> – весовой коэффициент функционального параметра η<sub>*j*</sub>, удовлетворяющий условию

$$\sum_{j=1}^4 \alpha_j = 1.$$

Функциональные параметры, изменяемые в диапазоне  $\{0 \div 1\}$ , характеризуют эффективность ЭПУД:  $\eta_1$  – по минимуму потерь;  $\eta_2$  - по максимуму импульса электродинамических сил;  $\eta_3$  - по величине электродинамических сил при ограниченном перемещении якоря  $\Delta Z_e$ ;  $\eta_4$  - по максимуму кинетической энергии. Стратегия нахождения минимума целевой функции ζ в поисковом пространстве заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров ЭПУД в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, стягивающего область параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров [11].

В качестве метода глобальной оптимизации использованы генетические алгоритмы, которые реализуют случайный поиск с централизованным управлением, используя отбор и генетические механизмы воспроизводства. По данному методу, оперируя совокупностью возможных решений, обрабатывается набор параметров, структурированный в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов отбора, кроссовера и мутации [12].

В качестве метода локальной оптимизации использован метод деформируемого многогранника [13]. По этому методу в пространстве параметров случайным образом инициируется популяция точек  $x_i$  - вершины многогранника (i=1,...,n), при этом каждая точка представляет собой вектор параметров  $\mathbf{x}=(x_1,...,x_n)$ . Они отображаются на пространство целевой функции  $\zeta(\mathbf{x})$  и на текущем шаге *t* определяются вершины с наибольшим и наименьшим значениями целевой функции. Новая точка  $\mathbf{z}^t$  формируется путем отражения вершины с максимальным значением целевой функции относительно центра масс всех остальных вершин. В новой точке вычисляется значение целевой функции и, в зависимости от сравнения полученной величины со значением целевой функции в вершине с минимальным значением целевой функции, многогранник деформируется относительно своего исходного состояния. Поскольку процедура деформации многократно повторяется, то многогранник адаптируется к локальному рельефу целевой функции и сжимается, обеспечивая сходимость алгоритма в локальном минимуме. На рис.1 показан расчетный алгоритм выбора параметров ЭПУД.

В качестве источника энергии использована батарея низковольтных электролитических конденсаторов, обладающих высокими удельными показателями, что обусловило схему возбуждения индуктора (тиристорное возбуждение с обратным шунтирующим диодом), формирующую апериодический (полярный) импульс тока.

На рис.2,а представлены рассчитанные механические характеристики ЭПУД для различных рабочих циклов: при отсутствии зазора ( $Z_e=0$ ) между бойком и объектом деформирования в начальном положении (жирные линии), при наличии небольшого ( $Z_e=5$  мм) зазора (тонкие линии), при отсутствии ( $Z_e=\infty$ ) взаимодействия между бойком и объектом деформирования (линии с круглыми метками). Как следует из полученных зависимостей, характер процессов ЭПУД претерпевает существенные изменения в зависимости от последовательности и изменения характера силовых импульсов, обеспечивающих циклическое ударное пробивание объекта деформирования.

Интегральные электродинамические силы, действующие на якорь в целом, проявляют существенную пространственную неравномерность. На рис.2,6 показано распределение аксиальной составляющей локальных сил  $f_z$ , действующих на круглый якорь с наружным радиусом  $r_{ex}$  в различные моменты времени при начальном зазоре  $Z_e=0$ . Наблюдается существенная неравномерность распределения локальных сил  $f_z$  по поверхности якоря: наименьшая в центре, а максимальная – вблизи наружной поверхности. Аксиальные локальные силы  $f_z$  значительно превосходят радиальные  $f_r$ . Такое соотношение аксиальных и радиальных локальных сил объясняется характером распределения результирующего магнитного поля в активной зоне ЭПУД, поскольку в зазоре между обмоткой индуктора и якорем магнитное поле в основном имеет радиальное направление. Таким образом, в рассматриваемом ЭПУД наблюдается сложная пространственно-временная картина распределения интегральных и локальных электродинамических сил, действующих на ускоряемый якорь, обусловленная возбуждаемым в индукторе и индуцированным в якоре токами.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки основных расчетных соотношений были проведены экспериментальные исследования на установке, включающей неподвижный индуктор 1, содержащий обмотку возбуждения, размещенную в неметаллическом каркасе, который прикреплен к неметаллической опорной пластине 2 (рис.3). К медному якорю 3 прямоугольной формы присоединена ударная пластина 4 из нержавеющей стали, которая воздействует на вертикально установленный боек 5, совершающий удары по верхней стальной плите 6. Ударная пластина 4 выполнена с отогнутыми вверх направляющими ребрами. Опорная пластина 2 прикреплена к нижней стальной плите 7. Плиты 6 и 7 соединены между собой посредством регулируемых опор 8, что позволяет изменять расстояние  $Z_e$  между бойком и плитой 6. Пружины 9 обеспечивают заданную силу противодействия движению и осуществляют возврат якоря 3 с ударной пластиной 4 в исходное положение до тесного контакта с индуктором 1 по окончании рабочего цикла при любом пространственном положении якоря.

На плите 6, ограничивающей движение бойка 5, сверху установлен пьезоэлектрический виброизмерительный преобразователь 10, который осуществляет преобразование механических колебаний, возникающих при ударе бойка, в электрические сигналы, передавая их в измеритель шума и вибрации ВШВ-003. Последний преобразует электрические сигналы в величины виброускорения  $a_f$  и виброскорости  $v_f$ . Экспериментальная установка позволяет измерять ток в индукторе и вибрацию плиты 6 при помощи двухканального электронного осциллографа *RIGOL DS 522M*.

В экспериментальных исследованиях использовались электролитические конденсаторы HJ с предельным напряжением  $U_0 = 450$  B и емкостями C=150 и 330 мкФ. Конденсаторы комплектовались в батареи емкостью  $C= 6\times330=1980$  мкФ;  $C=19\times150=2850$  мкФ;  $C=6\times330+19\times150=$ 4830 мкФ и  $C=20\times330=6600$  мкФ.

На рис.4 представлены осциллограммы тока в индукторе  $i_1$  и виброускорения  $a_f$  при использовании емкостного накопителя с параметрами C=4830 мкФ,  $U_0 = 300$  В и различных расстояниях от бойка до верхней плиты  $Z_e$ . Как видно, вибрации возникают в плите с некоторым запаздыванием  $t_{3an0}$  по отношению к моменту возникновения тока в индукторе, даже при отсутствии хода якоря. При увеличении  $Z_e$  возрастает и интервал запаздывания  $t_{3an}$ , необходимый для соударения с верхней плитой. При заданном расстоянии до пластины  $Z_e$  можно легко вычислить среднюю скорость якоря на рассматриваемом участке движения:

$$V_{\tilde{n}\tilde{o}} = Z_e \left( t_{\tilde{c}\tilde{a}\tilde{i}} - t_{\tilde{c}\tilde{a}\tilde{i}} \right)^{-1}.$$

Таким, образом, при экспериментальных исследованиях определялись:

- форма и амплитудное значение тока индуктора  $i_{1m}$ ;
- длительность фронта импульса тока  $t_{\phi p}$ ;
- полная длительность импульса тока t<sub>имп</sub>;
- средняя скорость якоря с ИЭ  $V_{cp}$ ;
- мгновенная сила  $f_z(t)$  удара бойка по верхней стальной плите, пропорциональный величине виброускорения  $a_f(t)$ ;
- импульс силы  $FI = \int f_z(t) dt$ , пропорциональный величине виброскорости  $v_f(t)$ .

При проведении экспериментальных исследований варьировались емкость *C* от 1980 до 6600 мкФ, зарядное напряжение батареи конденсаторов  $U_0$  от 100 до 450 В, величина хода якоря  $Z_e$  от 0 до 30 см. На рис.5,а показаны формы импульсов тока в индукторе  $i_1$  при наличии и отсутствии якоря при возбуждении от емкостного накопителя с параметрами: C=2850 мкФ,  $U_0=400$  В. Якорь, магнитно взаимодействующий с индуктором, обуславливает увеличение амплитуды тока  $I_{1max}$ , уменьшая длительность фронта импульса  $t_{dp}$  и ускоряя его затухание.

Измеренные значения средней скорости якоря с ИЭ  $V_{cp}$  при различной величине  $Z_e$  на 8 – 15 % ниже расчетных, что можно объяснить неучетом всех противодействующих сил. Аналогичные зависимости проявляются между расчетными и экспериментальными значениями импульса силы *FI* (рис.5,б), полученными при *C*=2850 мкФ,  $U_0$ =400 В. Таким образом наибольшие значения импульса силы *FI* возникают при заторможенном якоре, снижаясь практически линейно с увеличением его хода  $Z_e$ .

В целом, между расчетными и экспериментальными данными имеется удовлетворительное соответствие, что свидетельствует об адекватности расчетной модели.

### КОНСТРУКЦИЯ ЭПУД

На базе проведенных исследований был изготовлен автономный ЭПУД с ограниченными массогабаритными параметрами и повышенной эффективностью работы, предназначенный для защиты информации на компьютере от несанкционированного доступа путем деформирования (пробивания) винчестера [14].

Функциональная схема ЭПУД включает (рис.6): зарядное устройство ЗУ, аккумулятор А, преобразователь ПР, обеспечивающий на выходе ток высокой частоты, трансформаторно-выпрямительный блок ТВ, обеспечивающий повышение напряжения переменного сигнала и его выпрямление, емкостной накопитель ЕН, разрядник Р, датчик положения ДП, регистрирующий перемещение якоря с бойком, коммутатор К, формирователь импульсов тока ФИ, неподвижный индуктор И и ускоряемый якорь Я. Блок управления БУ обеспечивает запуск преобразователя, задает величину напряжения и форму разрядного тока в индукторе. После подачи управляющего импульса осуществляется заряд емкостного накопителя ЕН и при достижении определенного напряжения срабатывает разрядник Р, осуществляя импульсное возбуждение индуктора И. Перемещение якоря Я с бойком при прямом ходе осуществляется под действием ЭДУ, действующей со стороны индуктора И, а при обратном ходе – под действием возвратной пружины. Такой цикл повторяется до проникновения бойка в винчестер на глубину, задаваемую датчиком положения ДП.

Конструктивно ЭПУД состоит из двух блоков (рис.7,а): электронного и силового, соединенных между собой силовыми и сигнальными проводами. Параметры ЭПУД представлены в таблице.

В состав электронного блока входят: зарядное устройство для аккумулятора с напряжением 12 В, преобразователь постоянного напряжения, обеспечивающий напряжение 450 В для емкостного накопителя, батарея из 20 конденсаторов *HJ* емкостью 150 мкФ; разрядник, обеспечивающее разряд емкостного накопителя на индуктор при напряжении 430 В. В состав силового блока входят: защитный кожух, оптический датчик положения бойка, каркас, возвратные пружины с перекрестными тягами, индуктор, якорь с силовой пластиной, боек и защищаемый винчестер (рис.7,6). В табл. представлены параметры ЭПУД.

Как установлено в процессе многочисленных испытаний, пробивание винчестера бойком происходит, как правило, после 1 удара, на что необходимо 3 с после подачи запускающего импульса. В случае использования винчестера с особо прочным корпусом ЭПУД возбуждает серию последовательных силовых импульсов для проникновения бойка на заданную глубину. При этом для возбуждения двух импульсов необходимо 7 с, для трех – 10 с и т.д. Отметим, что за три импульса пробивался винчестер с самым прочным корпусом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм выбора параметров ЭПУД, обеспечивающего возвратно-поступательное движение якоря, ход и характер перемещения

которого изменяется для каждого последующего рабочего цикла. Выбор параметров основан на совместном использовании генетических алгоритмов, осуществляющих случайный поиск параметров в заданном пространстве, и метода деформируемого многогранника, стягивающего область параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров.

Установлено пространственно-временное распределение интегральных и локальных электродинамических сил, действующих на ускоряемый якорь.

Проведены экспериментальные исследования ЭПУД, при которых измерялись форма и параметры импульса тока индуктора, средняя скорость якоря, мгновенная величина и импульс силы удара бойка по массивной стальной плите. Экспериментальные исследования подтвердили достоверность расчетной методики.

Изготовлен и испытан автономный ЭПУД с ограниченными массогабаритными параметрами и повышенной эффективностью работы.

#### Литература к статье

## Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

- Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Техническая электродинамика. - 2001. - № 2. – С. 3-6.
- Тютькин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. - № 11. - С. 24-28.
- Карпухин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Труды междун. науч.техн. конф. «Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития». - Самара: Изд. учеб. лит. - С. 99-103. - 2007.
- Стрижаков Е.Л., Хахин Н.А., Бацемакин Д.С. Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки. Автоматическая сварка. 2004. № 2. С. 53-55.
- Татмышевский К.В., Семенович М.Л., Козлов С.А. Магнитноимпульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов и средств бронезащиты // Известия РАРАН. – 2005. №4. – С. 22-31.
- Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L. et al. Improved performance of linear induction launchers // IEEE Trans. on Magnetics. - 2005., Vol. 41, № 1. - P. 171-175.
- 7. He J.L., Zabar Z., Levi E.et al. Transient performance of linear induction launchers // IEEE Trans. on Magnetics. – 1991. Vol. 27, № 1. P. 585-590.
- Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // Техниче-

ская электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы современной электротехники. - 2006, Ч. 2. - С. 65-70.

- Васьковский Ю.Н. Автоматизированный синтез параметров индукционно-динамического двигателя // Техническая электродинамика. - 1988.
  № 3. - С. 61-67.
- 10.Alotto P.G., Eranda C., Brandstatter B. et al. Stochastic algorithms in electromagnetic optimization // IEEE Trans. on Magnetics. - 1998. - Vol. 34, №5. - P. 3674-3684.
- 11.Болюх В.Ф. Лысенко Л.И., Болюх Е.Г. Выбор и анализ параметров высокоэффективных электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа // Электротехника. – 2004. - № 12. - С. 2-10.
- 12.Lysenko L.I., Omelyanenko V.I., Sergeev S.A. Parallel genetic algorithm and its application to linear synchronous motor optimization // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. - 1998. - V.9, №3. - P. 303-314.
- 13.Голоскоков Е.Г., Северин В.П. Модификация метода деформируемого многогранника для оптимизации иерархической последовательности критериев // Техническая кибернетика и ее приложения. - Харьков: Выща школа. - 1986. - С. 27-30.
- 14.Пат. РФ № 2305329, МКИ G11В 5/024. Способ защиты информации и устройство для его осуществления / Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. З. № 2005120956. Заявл. 04.07.2005. Опубл. 28.08.2007, Бюл. № 24.

Размеры силового блока	$185 \times 112 \times 100 \text{ MM}^3$
тазмеры сплового олока	105×112×100 MM
Размеры электронного блока	225×119×54 мм <sup>3</sup>
Масса силового блока	2,2 кг
Масса электронного блока	1,4 кг
Диаметр бойка	5 мм
Длина рабочего хода бойка	15 мм
Мощность в импульсе	10 кВт
Энергия удара	30 Дж
Максимальная скорость якоря	13,6 м/с
Число ударов в мин	20
Питание от аккумулятора с напряжением	12 B
Режим работы	Повторно-кратковременный,
	ПВ=0,005
Рабочее положение	Произвольное

Массогабаритные и электромагнитные параметры ЭПУД

# Подрисуночные подписи к статье Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

- Рис.1 Расчетный алгоритм по выбору параметров ЭПУД
- Рис.2 Временные зависимости механических параметров (а) и пространственное распределение аксиальной составляющей локальных электродинамических сил в якоре (б)
- Рис.3 Установка для экспериментальных исследований ЭПУД
- Рис.4 Осциллограммы тока в индукторе (канал CH1) и виброускорения (канал CH2) при: а)  $Z_e = 0$  мм; б)  $Z_e = 10$  мм
- Рис.5 Формы токов в индукторе (а) и значения импульса силы от величины перемещения якоря (б). Тонкие линии соответствуют расчетным, а жирные экспериментальным данным
- Рис.6 Функциональная схема ЭПУД
- Рис.7 Общий вид электронного и силового блоков (без верхней крышки) (а), и вид с торца силового блока в сборе (б)





a)



Рис.2

















Рис.5





a)



#### АННОТАЦИЯ

#### к статье

## Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Разработан алгоритм выбора параметров электромеханического преобразователя ударного действия, основанный на совместном использовании генетических алгоритмов и метода деформируемого многогранника. Установлено пространственно-временное распределение интегральных и локальных электродинамических сил, действующих на ускоряемый якорь. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достоверность расчетной методики. Изготовлен и испытан автономный преобразователь с ограниченными массогабаритными параметрами и повышенной эффективностью работы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромеханический преобразователь ударного действия, алгоритм выбора параметров, генетические алгоритмы, метод деформируемого многогранника, экспериментальные исследования, автономный преобразователь

## Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.O., Shchukin I.S. HIGH-EFFICIENCY IMPACT ELECTROMECHANICAL CONVERTER

An algorithm for choosing the parameters of the impact electromechanical converter, based on the genetic algorithms and the flexible polyhedron method joint use is developed. Spatial-temporal distribution of integral and local electrodynamics forces acting on the accelerated anchor is found. The account method is confirmed by experimental research. Converter with limited mass-volume parameters and improve efficiency is manufactured and tested.

*KEY WORDS:* impact electromechanical converter, algorithm for choosing the parameters, genetic algorithms, flexible polyhedron method, experimental research, converter with limited mass-volume parameters

## Сведения об авторах статьи Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

**БОЛЮХ Владимир Федорович** – профессор кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»), бывший Харьковский политехнический институт (ХПИ).

Ученая степень - доктор технических наук. Ученое звание - профессор.

Окончил физико-технический факультет ХПИ по специальности «Криогенная техника» в 1979 г.

Защитил докторскую диссертацию в НТУ «ХПИ» на тему «Научнотехнические основы создания электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа с криорезистивными обмотками» в 2003 г.

Дом. адрес: 61120, Украина, г. Харьков-120, ул. Гвардейцев Широнинцев,

18-Г, кв. 82. Дом. тел. (0572) 63-76-19; Раб. тел. (057) 707-64-27; E-mail: <u>bolukh@kpi.kharkov.ua</u>, <u>bolyukh@gmail.com</u>

**ЛУЧУК Владимир Феодосьевич** – старший научный сотрудник кафедры электрических машин НТУ «ХПИ».

Ученая степень - кандидат технических наук. Ученое звание – старший научный сотрудник.

Окончил электромашиностроительный факультет ХПИ по специальности «Промышленная электроника» в 1974 г.

Защитил кандидатскую диссертацию в ХПИ на тему «Эксплуатационная диагностика подшипниковых узлов маломощных асинхронных двигателей» в 1983 г.

Дом. адрес: 61014, Украина, г. Харьков-14, пер. Ногина, 11, кв. 5. Раб. тел. (057) 707-22-1327; (057) 714-09-43 E-mail: <u>tech@tetra.kharkiv.com</u> РАССОХА Максим Алексеевич – аспирант кафедры общей электротехники НТУ «ХПИ».

Окончил факультет интегрированных технологий НТУ «ХПИ» в 2008 г. Магистр.

Дом. адрес: Украина, 61120, Харьков-120, пр. Тракторостроителей, 77, кв.4.

Tel:62-34-80; Раб. тел. (057) 707-64-27

E-mail: maxrassoha@rambler.ru

ЩУКИН Игорь Сергеевич – доцент кафедры электрических машин НТУ «ХПИ».

Ученая степень - кандидат технических наук. Ученое звание – доцент.

Окончил физико-технический факультет ХПИ по специальности «Инженерная электрофизика» в 1984 г.

Защитил кандидатскую диссертацию в ХПИ на тему «Моделирование и исследование тепловых процессов в двигателях постоянного тока для привода механизма подачи угольных комбайнов при детерминированных и случайных режимах работы» в 1990 г.

Дом. адрес: 61136, Украина, г. Харьков-136, ул. Командарма Уборевича, 30-В, кв. 147.

Раб. тел. (057) 707-22-1327; (057) 714-09-43 E-mail: <u>tech@tetra.kharkiv.com</u>

Просьба переписку по статье вести по адресу:

61120, Украина, г. Харьков-120, ул. Гвардейцев Широнинцев, 18-Г, кв. 82, Болюх В.Ф. E-mail: : <u>bolukh@kpi.kharkov.ua</u>, vf<u>bolyukh@gmail.com</u>